

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

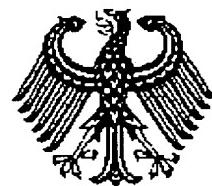
Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 102 32 230.9

Anmeldetag: 17. Juli 2002

Anmelder/Inhaber: pro-beam AG & Co KGaA, Planegg/DE

Bezeichnung: Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls, insbesondere eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen einer Optik für einen Elektronenstrahl und/oder zum Justieren einer Optik für einen Elektronenstrahl, Meßstruktur für ein solches Verfahren und Elektronenstrahlbearbeitungsgerät

IPC: G 01 T, H 01 J

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 16. Juli 2003
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident
Im Auftrag



Agurks

PATENTANWÄLTE

DR. ULRICH OSTERTAG

DR. REINHARD OSTERTAG

EIBENWEG 10 D-70597 STUTTGART TEL. +49-711-766845 FAX +49-711-7655701

Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls, insbesondere eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen einer Optik für einen Elektronenstrahl und/oder zum Justieren einer Optik für einen Elektronenstrahl, Meßstruktur für ein solches Verfahren und Elektronenstrahlbearbeitungsgerät.

Anmelder: pro-beam AG & Co. KGaA
Behringstr. 6
82152 Planegg

Anwaltsakte 8195.8

TIT.02-085

Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls, insbesondere eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen einer Optik für einen Elektronenstrahl und/oder zum Justieren einer Optik für einen Elektronenstrahl, Meßstruktur für ein solches Verfahren und Elektronenstrahlbearbeitungsgerät.

10 =====

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls, insbesondere eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen einer Optik für einen Elektronenstrahl und/oder zum Justieren einer Optik für einen Elektronenstrahl, eine Meßstruktur für ein solches Verfahren und ein Elektronenstrahlbearbeitungsgerät.

20 In der vorliegenden Beschreibung und den Ansprüchen soll unter Optik für einen Elektronenstrahl eine beliebige Anordnung verstanden werden, welche die Geometrie des Strahlquerschnittes eines Elektronenstrahles und/oder die Ausrichtung der Strahlachse eines Elektronenstrahles beeinflussen kann. Es sind dies in der Praxis elektrische und/oder magnetische optische Komponenten, insbesondere elektrische und/oder magnetische Linsen, Stigmatorien und Ablenker.

30 Eine Optik kann durch eine einzige solche Komponente gebildet sein oder mehrerer solche Komponenten umfassen.

Um z.B. beim Elektronenstrahlschweißen Schweißnähte mit gleichbleibender und bekannter Güte erzeugen zu können, ist es von Vorteil, wenn man das Intensitätsprofil des im

Elektronenstrahlschweißgerät verwendeten Elektronenstrahls kennt und möglichst unmittelbar vor dem Prozeß vermessen kann.

- 05 Auch die Kenntnis der Abbildungseigenschaften einer Strahl-Optik des Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts und die Möglichkeit, Strahlquerschnitt und Abbildungseigenschaften automatisch auf Sollwerte einzuregeln wären für das Bearbeiten von Werkstücken mit Elektronenstrahlschweißen
10 von Vorteil.

Üblicherweise erfolgt die Vermessung des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls so, daß nacheinander bekannte Teile des Elektronenstrahls in einen Auffänger, insbesondere einen Faraday-Käfig geleitet wird. Wie im Buch von Schultz "Elektronenstrahlschweißen", Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVS-Verlag auf den Seiten 15 bis 20 beschrieben, können verschiedenartige Meßkörper eingesetzt werden, um einen Teil des Strahls in den Auffänger zu leiten,
15 wobei der Elektronenstrahl mittels eines Magnetfelds relativ zu dem Meßkörper ausgelenkt wird, so daß nacheinander verschiedene Querschnittsteile des Elektronenstrahls
20 in den Auffänger gelangen.

- 25 Der einfachste solche Meßkörper umfaßt eine Schwellenkante. Zwei gegenüberliegende derartige Meßkörper bilden eine Meßstruktur mit einer Schlitzblende, hinter der der durchgetretene Teil des Strahles durch einen dort liegenden Sensor gemessen wird. Durch eine solche Meßstruktur kann
30 das Strahlprofil in einer Richtung vermessen werden. Mittels einer Lochblende kann das Intensitätsprofil eines Elektronenstrahls auch in einer zweiten Richtung dazu vermessen werden, wobei der Elektronenstrahl Teilstrahl
35 für Teilstrahl nacheinander über das Loch geleitet wird, mittels des o. g. Magnetfelds, wobei die Steuertechnik

aus der Rasterelektronenmikroskopie bekannt ist.

Ein Nachteil im Stand der Technik besteht darin, daß ein auf der Achse der Elektronenkanone (nachstehend kurz: Strahlhauptachse) angeordneter Auffänger an der Stelle in einem Elektronenstrahlbearbeitungsgerät Platz wegnimmt, wo das Werkstück angeordnet wird. Ein abzweigend vom eigentlichen Elektronenstrahlengang in einem zweiten Strahlengang angeordneter Auffänger (Sensor) braucht zusätzlichen Platz. Auch hat man in diesem Falle für die Messung der Intensitätsprofile nicht exakt dieselben Verhältnis wie beim späteren Schweißen.

Es ist Aufgabe der Erfindung, bei kompakter Bauweise des Gerätes eine Elektronenstrahlvermessung zu ermöglichen.

Diese Aufgabe ist gelöst durch ein Verfahren mit den im Anspruch 1 aufgeführten Merkmalen.

Erfindungsgemäß wird der Elektronenstrahl durch eine Relativbewegung zu einer Meßstruktur auf verschiedene Stellen von dieser geleitet, die unterschiedliche Rückstreueigenschaften aufweisen und der Elektronenstrom der RückstreuElektronen wird in Abhängigkeit von der Relativbewegung von Elektronenstrahl und Meßstruktur gemessen.

Unter RückstreuElektronen wird im Rahmen der vorliegenden Anmeldung jedes von einer Oberfläche mit einer Komponente in Gegenrichtung zur eigentlichen Elektronenausbreitung zurückgesandte Elektronen verstanden, d.h. Rückstreu-Elektronen im engeren Sinne und Sekundärelektronen.

Dadurch, daß die RückstreuElektronen gemessen werden, kann ein entsprechender Sensor, beispielsweise ein Sensorring, um den Elektronenstrahl herum in der Nähe der ohnehin

vorhandenen Auslenkmagnete angeordnet werden, ohne daß zusätzlicher Platz benötigt wird.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens
05 ist der, daß zu seiner Durchführung nur eine passive Meßstruktur zusätzlich benötigt wird, so daß zum Meßraum keine zusätzlichen elektrischen Leitungen verlegt werden müssen, was bei für die Serienfertigung dienenden Elektronenstrahl-Schweißgeräten, bei den die Werkstücke
10 auf Paletten angeordnet ein- und ausgeschleust werden, mit Schwierigkeiten verbunden wäre.

} Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in Unteransprüchen angegeben.

15 Die Weiterbildung nach Anspruch 2 hat den Vorteil, daß Meßstrukturen, wie sie bereits bekannt sind, verwendet werden können, wobei der transmittierende Teil der Meßstruktur, also die Öffnung, nicht rückstreut und der
20 Rest der Meßstruktur zumindest schwach rückstreut.

Bei einigen Elektronenstrahlbearbeitungsgeräten ist ohnehin vorgesehen, daß ein zu bearbeitendes Werkstück mittels einer Rasterelektronen-Bilderzeugungsfunktion vor dem
25 Bearbeiten betrachtet werden kann. In diesem Falle ist es von besonderem Vorteil, die Erfindung einzusetzen, weil zur Bildgebung dieselben Sensoren verwendet werden können, wie sie als RückstreuElektronenmeßgeräte dienen.
30 Mit der Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 3 erhält man einen besonders guten Kontrast zwischen den durch den Meßkörper rückgestreuten Elektronen, die zum Ausmessen des Querschnittsprofils des Elektronenstrahls verwendet werden, und diffus von der Oberfläche einer
35 Basis der Meßstruktur etwa rückgestreuten Elektronen.

Auch die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 4 ist im Hinblick auf guten Kontrast bei der Ausmessung des Querschnittsprofiles von Vorteil.

05

Ist die zum Ausmessen des Strahlquerschnitts dienende Rückstreufläche von der Oberseite einer Basis der Meßstruktur beabstandet, wie im Anspruch 5 angegeben, wirkt sich dies ebenfalls günstig auf die Präzision der Messung und den Kontrast der Querschnittsmessung aus.

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 6 ist im Hinblick auf niedere Herstellungskosten für kleine Rückstreuflächen und im Hinblick auf guten Kontrast von 15 Vorteil.

Auch die Weiterbildung gemäß Anspruch 7 dient einer Verbesserung des Rückstreuverhaltens der Rückstreufläche.

20 Mit der Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 8 wird erreicht, daß hinter der Rückstreufläche liegende Umfangsabschnitte der Nadel nicht zu zusätzlichen rückgestreuten Elektronen führen, was den Kontrast des Meßverfahrens beeinträchtigen würde.

25

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 9 ist im Hinblick auf hohe Auflösung des Meßverfahrens von Vorteil.

Gemäß Anspruch 10 werden die rückgestreuten Elektronen 30 auf sehr einfache Weise gemessen. Entsprechende Sensorringe sind auch in solchen Elektronenstrahlbearbeitungsgeräten oft schon vorhanden, bei denen auch die Möglichkeit zur rasterelektronischen Bilderzeugung einer Werkstückoberfläche besteht.

35

- Im Prinzip kann man die Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl und Meßstruktur sowohl durch eine Bewegung der Meßstruktur als auch durch eine Bewegung des Elektronenstrahles (als auch durch eine Bewegung von Elektronenstrahl und Meßstruktur) erzeugen. Die im Anspruch 05 angegebene Art der Erzeugung der Relativbewegung läßt sich aber ohne mechanische Mittel und sehr rasch durchführen und ermöglicht auch die Bestimmung der Qualität der Strahlablenkung durch die Optik.
- 10 Verwendet man bei dem Verfahren zum Bestimmen des Intensitätsprofiles eines Elektronenstrahles eine Meßstruktur, wie sie im Anspruch 12 angegeben ist, so kann man das Intensitätsprofil gleichzeitig für eine Mehrzahl unterschiedlicher Auslenkungswinkel des Elektronenstrahles messen. Auf diese Weise läßt sich ermitteln, ob und in welchem Ausmaße das Intensitätsprofil von der Ablenkung des Elektronenstrahles abhängt.
- 15 20 Dabei kann man mit dem Verfahren gemäß Anspruch 13 das Intensitätsprofil innerhalb eines vorgegebenen Gesamt-Ablenkungsbereiches für den Elektronenstrahl an verschiedenen gleichförmig über den Ablenkbereich verteilten Stellen messen.
- 25 30 Dabei ist mit der Weiterbildung gemäß Anspruch 14 gewährleistet, daß die Rückstreuflächen jeweils senkrecht zur mittleren Richtung des Elektronenstrahles ausgerichtet sind.
- 35 Verwendet man gemäß Anspruch 15 kreisförmige Rückstreuflächen, so verhalten sich diese Rückstreuflächen isotrop, d.h., man kann in beliebiger Richtung über sie hinwegfahren, ohne daß richtungsabhängige Korrekturen der Meßsignale notwendig wären.

Verwendet man gemäß Anspruch 16 eine Meßstruktur mit schmalen rückstreuenden Bändern, so kann man auf einfache Weise eine grobe Information der Intensitätsverteilung 05 im Elektronenstrahl über eine größere Meßfläche hinweg erhalten. Derartige Meßstrukturen eignen sich auch gut zum Austesten der Abbildungseigenschaften der Elektronenstrahl-Optik und als Ist-Signalgeber für eine Regelschaltung, mit welcher der Querschnitt des Elektronenstrahles 10 automatisch minimiert wird und/oder Soll-Abbildungseigenschaften der Optik eingestellt werden.

Bei dem Verfahren gemäß Anspruch 17 wird das Intensitätsprofil des Elektronenstrahles in zwei zueinander senkrechten Richtungen gemessen, so daß man eine vollständige flächenhafte Information über die Energiedichte im Elektronenstrahl hat. Macht man dies für unterschiedliche Fokussierungsbedingungen (Ändern der Bestromung der Fokus- 15 sierlinse) oder unterschiedliche Stellung der Meßstruktur 20 auf der Strahlachse, so erhält man eine komplette räumliche Strahl-Tomographie.

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 18 ist wiederum im Hinblick darauf von Vorteil, einerseits 25 für die rückstreuenden Oberflächen oder die größere Durchlässigkeit aufweisenden Oberflächen den notwendigen mechanischen Halt zu schaffen, andererseits aber zu verhindern, daß der mechanische Halt für die Oberflächen- 30 unregelmäßigkeiten bezüglich der Absorption/Rückstreuung in nennenswertem Maße zu unerwünschten gestreuten Elektronen führt.

Das Verfahren gemäß Anspruch 19 gestattet es, unter Verwendung einer regelmäßigen Meßstruktur, die an sich 35 für die Vermessung des Intensitätsprofiles eines Elektro-

nenstrahles gedacht war, zugleich auch die Abbildungseigenschaften der Elektronenstrahl-Optik zu messen.

Mit dem im Anspruch 20 angegebenen Verfahren kann man
05 sich auf einfache Weise ein einfach auswertbares Gesamtbild über die Abbildungseigenschaften der Optik verschaffen.

Gemäß Anspruch 21 kann man automatisch den Elektronenstrahl so fokussieren, daß der Querschnitt des Elektronenstrahles ein Minimum annimmt.
10

Die im Anspruch 22 angegebene Meßstruktur hat einen mechanisch besonders einfachen Aufbau.

15 Die Weiterbildung der Meßstruktur gemäß Anspruch 23 dient wieder dazu, Verfälschungen des Meßergebnisses durch geometrische Effekte zu vermeiden.

Eine Meßstruktur gemäß Anspruch 24 zeichnet sich durch
20 mechanisch besonders einfachen Aufbau und guten Kontrast aus.

Dabei erhält man gemäß Anspruch 25 auf einfache Weise präzise räumlich orientierte und gut rückstreuende Rückstreuflächen.
25

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 26 gewährleistet wieder, daß die Rückstreuflächen auf einfache Weise zuverlässig und bleibend im Raum orientiert werden,
30 ohne daß die hierzu verwendeten mechanischen Mittel zu unerwünschten rückgestreuten Elektronen führen.

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 27 schafft eine Meßstruktur, die wieder zum Messen des Querschnittsprofiles eine Elektronenstrahles für unterschiedliche
35

Auslenkungswinkel geeignet ist und eine einfache Auswertung des Stromes rückgestreuter Elektronen ermöglicht.

Bei einer Meßstruktur, wie sie im Anspruch 28 angegeben
05 ist, kann man einerseits auf einfache Weise die Abbildungseigenschaften der Elektronenstrahl-Optik testen (über die Gitterlinien) und zugleich auch die Intensitätsprofile des Elektronenstrahles für unterschiedliche Auslenkwinkel einfach ermitteln (über die Rückstreuflächen).

10

Der Anspruch 29 betrifft eine Meßverfahren, mit welchem aus dem Strom der durch die Meßstruktur hindurchtretenden Elektronen der Strahlquerschnitt und/oder die Abbildungseigenschaften der Optik ermittelt werden.

15

Die Ansprüche 30 bis 33 betreffen Elektronenstrahl-Bearbeitungsgeräte, bei denen auf einfache Weise das Intensitätsprofil des Elektronenstrahles und die Abbildungseigenschaften der Optik für den Elektronenstrahl gemessen
20 werden können.

Die Weiterbildungen gemäß Anspruch 34 und 35 sind im Hinblick auf scharfe und kontrastreiche Abbildung kleiner bzw. ausgedehnter Rückstreuflächen einer Meßstruktur von
25 vorteil.

Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren, mit dem die Güte der Optik des Elektronenstrahlbearbeitungsgerätes bestimmt wird, werden die Sensoren zum Messen der RückstreuElektronen so verwendet, daß eine rasterElektronische Aufnahme einer Meßstruktur gemacht, die Teile mit unterschiedlichen RückstreuEigenschaften aufweist, und diese Aufnahme wird dann ausgewertet. Aus Verzerrungen in dem Bild kann, insbesondere auch unter Zuhilfenahme eines Rechners, auf
30 35 die Güte der Magnetoptiken von Fokussiereinheit und Optik

zurückgeschlossen werden.

Verwendet wird hierzu vorzugsweise eine etwas andere Meßstruktur, die eine regelmäßige Struktur, insbesondere ein Gitter oder Netz umfaßt, damit übliche aus der Optik bekannte Rechenverfahren zur Berechnung der Verzerrung eingesetzt werden können. Bei einer bevorzugten Ausführungsform bestehen die Gitter- oder Netzlinien aus einem stark rückstreuenden Material, insbesondere einem Metall, während ihr Untergrund aus einem nicht oder nur schwach rückstreuenden Material gebildet ist, beispielsweise Graphit.

Auch eine Meßstruktur mit regelmäßig angeordneten Stellen erhöhter Durchlässigkeit (z. B. Bohrungen) oder mit regelmäßig angeordneten Stellen erhöhter Rückstreuung (z.B. Rückstreuflächen) oder mit einem Gitter oder Netz sind Gegenstand der vorliegenden Erfindung, wobei bevorzugte Ausführungsformen die o.g. Materialeigenschaften aufweisen.

Denkbar ist auch, daß eine Nadel oder mehrere Nadeln mit geschliffener Endfläche oder andere Rückstreulemente, die beim Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eingesetzt wird/werden, in eine Meßstruktur mit Gitternetz vorzugsweise lösbar eingesetzt sind, um sowohl Intensitätsprofile des Strahles als auch Abbildungseigenschaften der Optik messen zu können.

Alternativ kann man eine Rückstreuflächenanordnung und eine rückstreuende Gitteranordnung auch auf seitlich benachbarten Bereichen der Oberseite der Basis einer Meßstruktur vorsehen, so daß diese Bereiche wahlweise auf die Hauptstrahlachse gestellt werden können.

Nachfolgend werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung unter Bezug auf die Zeichnung beschrieben. Dort zeigen:

05 Figur 1: schematisch den Aufbau zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahlenschweißgeräts;

10 Figur 2: schematisch den Aufbau zum Messen der Abbildungseigenschaften von Magnetooptiken in einem Elektronenstrahlenschweißgerät;

15 Figur 3: eine Ansicht auf eine abgewandelte Meßstruktur mit ein Gitter bildenden schmalen Rückstrebändern;

20 Figur 4: einen transversalen Schnitt durch die Meßstruktur nach Figur 3 längs der dortigen Schnittlinie IV-IV;

Figur 5: einen vergrößerten transversalen Schnitt durch ein Rückstrebband der Meßstruktur nach Figur 3;

25 Figur 6: einen transversalen Mittenschnitt durch eine abgewandelte Meßstruktur;

Figur 7: einen transversalen Mittelschnitt durch eine nochmals abgewandelte Meßstruktur; und

30 Figur 8: eine Ansicht auf eine weiter abgewandelte Meßstruktur.

In einem Elektronenstrahlenschweißgerät wird ein Elektronenstrahl 10 von einer als einzelne Linse 12 gezeigten steuerbaren Fokussiereinheit fokussiert. Diese kann insbe-

sondere einen Stigmator (zwei unter 90° angeordnete Zylinderlinsen) umfassen, die getrennt steuerbar sind, um die Form des Strahlquerschnittes zu modifizieren, insbesondere auf Kreisform zu bringen.

05

In Figur 1 ist bei A die Hauptstrahlrichtung angedeutet, das ist die Richtung, in welcher der Elektronenstrahl 10 von der nicht im einzelnen dargestellten Elektronenkanone des Schweißgerätes erzeugt wird und in welcher er auf 10 ein Werkstück (nicht dargestellt) unter Arbeitsbedingungen auftrifft, wenn er nicht abgelenkt wird.

Der Elektronenstrahl 10 kann mittels einer magnetischen Ablenkeinheit 14, die hinter der Linse 12 liegt, senkrecht 15 zur Strahlrichtung abgelenkt werden. Die Ablenkeinheit 14 umfaßt mindestens zwei getrennt steuerbare Spulen (nicht im einzelnen gezeigt) zur Ablenkung des Elektronenstrahles 10 in zwei zu einander senkrechten Richtungen.

20 Die Fokussiereinheit 12 und die Optik 14 bilden zusammen eine Optik 15 des Elektronenstrahlschweißgerätes.

Zum Vermessen des Intensitätsprofils des Elektronenstrahls 10 ist eine im ganzen mit 16 bezeichnete Meßstruktur 25 vorgesehen. Diese besteht aus einer als Graphitplatte 18 ausgebildeten Basis mit einer ebenen Oberfläche 20, von der im Zentralbereich, d.h. in dem Bereich, auf den der Elektronenstrahl 10 auftrifft, wenn er von der Ablenkeinheit 14 nicht stark ausgelenkt wird, senkrecht nach oben 30 eine Wolframnadel 22 absteht.

Die Wolframnadel 22 ist an ihrer zur Elektronenstrahlquelle weisenden, senkrecht auf der Hauptstrahlrichtung A stehenden ebenen Endfläche glatt geschliffen. Auch die 35 Oberfläche 20 der Graphitplatte 18 steht senkrecht auf

der Haupstrahlrichtung A.

Der Durchmesser der Wolframnadel 22 ist so bemessen, daß er deutlich kleiner als der Durchmesser des Elektronenstrahls 10 ist.

Die Wahl der Materialien für die Meßstruktur 16 und ihre Geometrie und Anordnung bewirken folgendes:

10 Die glattgeschliffene transversale Endfläche der Wolframnadel 22 wirkt stark rückstreuend, d.h. Elektronen aus dem Elektronenstrahl 10 werden in die Richtung A, aus der der Elektronenstrahl 10 kommt bzw. in eine Richtung mit einer Komponente in die Richtung der Elektronenquelle, zurückgelenkt. Rückstreuerelektronen von der Nadel 22, die erhalten werden, wenn der Elektronenstrahl 10 die Spitze der Nadel 22 überstreicht, sind in Figur 1 schematisch bei 24 andeutet. Die Graphitplatte 18 hingegen wirkt kaum rückstreuend, so daß sich die Wolframnadel 22 gegen die 20 Oberfläche 20 stark abhebt.

Die Rückstreuerelektronen werden mittels eines Sensorrings, der im ganzen mit 26 bezeichnet ist und aus vier Sensorsegmenten 28 besteht, vermessen, wobei der Senserring 26 den Pfad des Elektronenstrahls im Querschnitt gesehen umgibt, wobei der Senserring ein herkömmlicher Ring der Art ist, wie er üblicherweise in rasterelektronischen Beobachtungseinrichtungen zum Auffangen von Rückstreuerelektronen verwendet wird. Aus diesem Grund kann der 30 Senserring 26 sowohl zur Messung des Stromes der Rückstreuerelektronen als auch zur Bildgebung verwendet werden.

Bei der Erfindung geht es zunächst darum, die Stärke des Rückstreuerelektronenstroms zu bestimmen, wobei es nicht 35 in erster Linie um die absolute Zahl der Rückstreuerelek-

tronen geht, die ja von dem Sensorring gar nicht alle erfaßt werden, sondern um das relative Intensitätsprofil des Elektronenstrahls 10, also die Verteilung der Elektronen im Elektronenstrahl 10 in zur Strahlrichtung
05 senkrechter Richtung.

Unter Strahlrichtung S soll die mittlere Richtung des Elektronenstrahles verstanden werden, wie sie von der Optik 14 erzeugt wird, abgesehen von Auslenkungen kleiner
10 Amplitude, die erfolgen, um den Elektronenstrahl 10 über der Endfläche einer Wolframnadel 22 zu rastern.

Wird der Elektronenstrahl 10 von der Ablenkeinheit 14 auf verschiedene Stellen der Meßstruktur 16 geleitet, so erhöht
15 und erniedrigt sich die Zahl der Rückstreuelektronen 24 je nach der Stelle auf der Meßstruktur 16, auf die der Elektronenstrahl 10 auftrifft. Eine besonders hohe Zahl von Rückstreuelektronen wird erzielt, wenn der Elektronenstrahl 10 auf die Wolframnadel 22 trifft.

20 Da der Elektronenstrahl 10 in seinem Durchmesser in der Ebene der Meßstruktur 16 bzw. der Oberfläche 20 größer ist als die Wolframnadel 22, treffen beim Überstreichen der Wolframnadel 22 durch den Elektronenstrahl 10 verschiedene Elektronenstrahlteile auf die Wolframnadel auf, und eine unterschiedliche Intensität des Strahls in diesen Teilen führt zu einer unterschiedlichen Zahl von Rückstreuelektronen.
25

30 Um das Strahlprofil systematisch zu erfassen (bzw. bei Arbeitsbedingungen des Elektronenstrahl über die Werkstückoberfläche zu führen), wird die Optik 15 von einer Rechen-, Steuer- und Speichereinheit 30 elektronisch gesteuert, und Signale von dem Sensorring werden der
35 Rechen-, Steuer- und Speichereinheit 30 zugeführt und in

Abhängigkeit von den Ablenk-Steuersignalen erfaßt. Dabei sind die Fokussiereeinheit 12 und die Ablenkeinheit 14 getrennt steuerbar.

- 05 Dies bedeutet im Meßmodus, daß in Abhängigkeit von einer Größe x (der Auslenkung in x-Richtung; vgl. das Koordinatensystem in Figur 1) und einer Größe y (der Auslenkung in y-Richtung) des Elektronenstrahls 10, welche durch die Optik 15 erzeugt wird, der Strom der Rückstreuerelektronen 10 24, die zum Sensorring 26 gelangen, erfaßt wird, wobei diese Daten als dreidimensionale Flächen (nicht gezeigt) ausgegeben werden können, oder auch in Form eines Bildes 32, das die Elektronendichte an einer bestimmten Stelle z des Elektronenstrahles in einer zur Strahlrichtung S 15 bzw. zur Hauptstrahlrichtung A senkrechten Richtung wiedergibt.

Mit einer anderen Meßstruktur, die in Figur 2 gezeigt ist und dort im ganzen mit 34 bezeichnet ist, läßt sich 20 unter Verwendung im wesentlichen desselben Aufbaus die Güte der Linse 12 und der Ablenkeinheit 14 vermessen, was eine wichtige Information zur Beurteilung der Qualität des Elektronenstrahlschweißgeräts darstellt.

- 25 Die Meßstruktur 34 umfaßt auch hier eine Graphitplatte 18 mit einer Oberfläche 20. Im Zentralbereich der Graphitplatte 18 befindet sich auf der Oberfläche 20 jedoch ein Metallnetz 36, d.h. ein Netz, dessen Netzlinien aus Metall bestehen. Das Netz kann direkt auf dem Graphit 18 aufliegen, 30 so daß auch hier Rückstreuerelektronen 24 von den Linien des Netzes ausgesandt werden, während der Graphithintergrund nicht rückstreuend wirkt.

Ein Unterschied zu Figur 1 besteht auch insofern, als zur 35 besseren Abbildung des Netzes 36 der Ort von Linse 12 und

Ablenkeinheit 14 vertauscht sind.

Unter Verwendung eines üblichen rasterelektronenmikroskopischen Bilderzeugungsverfahrens kann mittels des Sensor-

05 rings 26 ein Bild 38 des Metallnetzes 36 vor dem Graphit-

untergrund erzeugt werden. Mittels der dem Fachmann

geläufigen Computerauswertung des Bildes 38 kann auf-

grund von Abweichungen der einzelnen Linien von deren

geradem Verlauf und den Verzerrungen am Rand des abgebil-

10 deten Netzes auf die Güte der Magnetoptiken der Ablenk-

einheit 14 rückgeschlossen werden.

Die Meßstruktur 34 kann - in Abwandlung - Teil der Meß-

struktur 16 aus Figur 1 sein, wobei dann die Wolframmadel

15 22 in einer kleinen Graphitplatte in die große Graphit-

platte 18 eingesetzt wird, und wenn sie dann entfernt

wird, ist das Metallnetz 36 in der Graphitplatte 18 dann

freigegeben.

20 Möglicherweise muß dann die Linse 12 nachfokussiert werden,

damit das Netz scharf abgebildet wird, während sie vorher

auf die Oberfläche 20, aus der die Wolframmadel 22 heraus-

stand, fokussiert war. Alternativ kann man die Entferungs-

differenz auch durch eine aus Graphit gefertigte Distanz-

25 platte aufnehmen.

Nochmals alternativ kann man eine Nadelanordnung und eine

Gitteranordnung auch nebeneinander liegend auf einer ge-

meinsamen Basis-Graphitplatte vorsehen und die beiden

30 Teilbereiche der Graphitplatte alternativ in den Strahlen-

gang stellen, z.B. mit einer kalibrierten Gewindespindel

oder mit einem kleinen Arbeitszylinder und die Platten-

endlagen vorgebenden Anschlägen.

35 Die Meßstrukturen 16 und 34 bzw. die oben angesprochenen

- kombinierten Meßstrukturen sind so ausgelegt, daß sie leicht und präzise in das Elektronenstrahlschweißgerät eingesetzt werden können und auch leicht wieder entnommen werden können (z.B. unter Verwendung von Paßstiften),
- 05 damit das Elektronenstrahlschweißgerät seine eigentliche Funktion ausüben kann. Es genügt hierfür, wenn in einer Abbildungsebene die Möglichkeit zur genau positionierten Anbringung der Graphitplatte 18 besteht.
- 10 Da die Meßstrukturen 16 und 34 passive Komponenten sind, müssen keine zusätzlichen Leitungen in den Meßraum/Arbeitsraum des Elektronenstrahlschweißgerätes verlegt werden, um den Strahlquerschnitt und die abbildungseigenschaften der Optik 15 zu bestimmen.

- 15
- Figur 3 zeigt in Aufsicht eine Meßstruktur 16, die wieder eine Basis 20 aus Graphit aufweist. Die obere Begrenzungsfäche der Basis 20 ist konkav kugelförmig gewölbt, wobei der Radius der oberen Stirnfläche 40 dem Abstand der Basis 20 vom Hauptpunkt H der Strahl-Ablenkeinheit 14 des Elektronenstrahl-Schweißgerätes entspricht. Unter dem "Hauptpunkt" soll derjenige Punkt verstanden werden, an dem der Elektronenstrahl bei idealisierter Darstellung von der Einfallsrichtung abknickt (ähnlich wie bei optischen Linsen).

- Auf die Stirnfläche 40 ist ein Netz 42 aufgebracht, welches aus unter rechtem Winkel zueinander angeordneten Sätzen von Rückstrebändern 44, 46 besteht. Die Rückstrebänder 44, 46 sind wieder aus einem Metall hoher Dichte wie z.B. Wolfram hergestellt und können auf eine beliebige bekannte Weise hergestellt sein, z.B. durch Herausschneiden aus einem dünnen polierten Blech mit einem Laserstrahl oder durch Aufkleben von entsprechend schmalen polierten Bändern im gewünschten Muster auf die Stirnfläche 40.

Wie aus Figur 5 ersichtlich, ist der Querschnitt der Rückstrebänder 46 rechteckig, so daß deren freie Oberseiten jeweils eine Rückstreufläche 48 bilden.

05

Um mit einer solchen Meßstruktur auch das Intensitätsprofil für verschiedene Strahlauslenkungen messen zu können, kann man in der Mitte ausgesuchter oder aller der Gitterzellen jeweils eine vorzugsweise sehr kurze Wolframnadel 22

10 mit im wesentlichen in der Fläche der benachbarten Rückstreubänder 44, 46 liegender Endfläche vorsehen. Dadurch,

daß man den Elektronenstrahl mit kleiner Amplitude über den verschiedenen Wolframnadeln 22 aufrastert, kann man dann die Intensitätsprofile des Elektronenstrahles 10 für

15 unterschiedliche Auslenkwinkel messen, durch Auslenkung des Elektronenstrahles über die Gitterlinien hinweg die Abbildungseigenschaften der durch Fokussiereinheit 12 und

Ablenkeinheit 14 gebildeten Optik 15.

20 Figur 6 zeigt einen Mittenschnitt durch eine weiter abgewandelte Meßstruktur 16, bei welcher die Basis 20 einzelne Wolframnadeln 22 trägt, die jeweils so schräg gestellt sind, daß ihre Achse durch den Hauptpunkt H der Elektronenstrahl-Ablenkeinheit verläuft. Die Meß-

25 struktur 16 nach Figur 6 hat somit eine Vielzahl von kleinen Rückstreuflächen, die jeweils senkrecht auf der Richtung eines ausgelenkten Elektronenstrahles stehen und gleichen Abstand vom Hauptpunkt H aufweisen.

30 Die Wolframnadeln 22 sind entweder so angeordnet, daß ihre Fußabschnitte auf der Oberseite der Basis 20 ein quadratisches Gitter bilden, oder auch so, daß jeweils ein Satz von Wolframnadeln 22 unter gleichem Abstand von der Achse der Elektronenkanone angeordnet sind und die 35 zu diesem Satz gehörenden Wolframnadeln 22 in Umfangs-

richtung unter äquidistantem Winkelabstand angeordnet sind.

- Die weiter abgewandelte Meßstruktur nach Figur 7 ähnelt
- 05 im rechten Teil derjenigen nach Figur 6 mit der Maßgabe, daß die Enden der Wolframmadeln 22 alle in derselben Ebene liegen und vorzugsweise dort so angeordnet sind, daß die Endflächen ein quadratisches Gitter bilden.
- 10 In der linken Hälfte von Figur 7 stehen die Wolframmadeln 22 alle senkrecht auf der Oberfläche der Basis 20. Eine solche Anordnung der Wolframmadeln 22 kann zuweilen dann von Interesse sein, wenn man nicht an der Intensitätsverteilung der Elektronen im Elektronenstrahl an sich
- 15 (senkrecht zur Strahlrichtung S) interessiert ist sondern nur an der Elektronenverteilung, soweit sie für das Schweißen relevant ist (oder auch dann, wenn der Ablenkradius groß gegen die Auslenkstrecke ist). Da beim Schweißen die Werkstückoberfläche in der Regel senkrecht auf
- 20 der Hauptstrahlrichtung A der Elektronenkanone steht, bilden die vielen rückstreuenden Endflächen der Wolframmadeln 22 gemäß der linken Hälfte von Figur 7 die Werkstückoberfläche an einer Vielzahl von Stützstellen nach.
- 25 Das Ausführungsbeispiel nach Figur 8 zeigt eine Meßanordnung zum Messen von Strahlquerschnitt und Abbildungseigenschaften, die eine Meßstruktur 16 und eine hinter dieser liegende elektrisch leitende Kollektorplatte 50 umfaßt. Die Meßstruktur 16 besteht aus einer Platte 52
- 30 aus Wolfram, in die in regelmäßigm Raster kleinen Durchmesser aufweisende Bohrungen 54 eingearbeitet sind, z.B. durch Elektronenstrahlbohren.
- Diese Anordnung arbeitet in Transmission und misst den
- 35 Strom der von der mit einem Strommesser (nicht gezeigt) verbundenen Kollektorplatte 50 aufgefangenen Elektronen in Abhängigkeit von der Auslenkung (und ggf. der Fokussierung) des Elektronenstrahles.

Patentansprüche

=====

1. Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls (10), insbesondere eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen einer Optik (15) für einen Elektronenstrahl und/oder zum Justieren einer Optik (15) für einen Elektronenstrahl, bei dem der Elektronenstrahl durch eine Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl und einer Meßstruktur (16) auf verschiedene Stellen (22, 20) von dieser geleitet wird, die unterschiedliche Rückstreuereigenschaften aufweisen, dadurch gekennzeichnet, daß ein Strom von der Meßstruktur (16) in Rückwärtsrichtung gestreuter Elektronen in Abhängigkeit von der Relativbewegung von Elektronenstrahl (10) und Meßstruktur (16) gemessen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, die zumindest eine den Elektronenstrahl durchlassende Öffnung, insbesondere einen Schlitz oder ein kreisförmiges Loch aufweist.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, die zumindest eine den Elektronenstrahl zumindest teilweise zurückwerfende Rückstreufläche aufweist.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreufläche senkrecht auf der mittleren Richtung des Elektronenstrahles steht.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreufläche von einer Erhebung (22) getragen ist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,
daß die Erhebung von einer Nadel (22), vorzugsweise
einer Metallnadel, insbesondere aus einem schweren Metall
05 wie Wolfram, gebildet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet,
daß die Nadel (22) an ihrem Ende geschliffen ist.
- 10 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeich-
net, daß die Achse der Nadel (22) parallel zur mitt-
leren Richtung des Elektronenstrahles verläuft.
- 15 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 8, dadurch
gekennzeichnet, daß der Schlitz, das Loch oder die
Rückstreufläche in zumindest einer Richtung eine Quer-
schnittslänge hat, die kleiner als der Elektronen-
strahldurchmesser ist.
- 20 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß der Strom der Rückstreu-
elektronen (20) mittels eines Sensorringes (26) gemessen
wird, der vorzugsweise eine Mehrzahl um die Achse des
Elektronenstrahles (10) verteilter, vorzugsweise äquidistant
25 verteilter, Sensorsegmente (28) umfaßt.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß die Relativbewegung
durch Ablenken des Elektronenstrahls mittels eines Mag-
30 netfeldes (14) oder elektrischen Feldes erzeugt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch
gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet
wird, die eine Mehrzahl von Schlitten und/oder Löchern
35 und/oder Rückstreuflächen aufweist, die unter unterschied-

lichem Abstand von der Einfallsrichtung des nicht ausgelenkten Elektronenstrahles angeordnet sind.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet,
05 daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, bei welcher die Schlitze, Löcher oder Rückstreuflächen gleichförmig in radialer Richtung und/oder Umfangsrichtung verteilt angeordnet sind.
- 10 14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet,
daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, bei welcher die Löcher und/oder Rückstreuflächen so ausgerichtet sind, daß ihre Achse bzw. Normale durch den Hauptpunkt der Optik (15) verläuft.
15
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreuflächen kreisförmig sind.
- 20 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreuflächen die Form schmaler Bänder haben.
- 25 17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl und Meßstruktur in zwei unabhängigen Richtungen erfolgt, die im wesentlichen in einer senkrecht zur Einfallsrichtung des nicht abgelenkten Elektronenstrahls (10) liegenden Ebene liegen.
30
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, die in der Nachbarschaft der Schlitze und/oder Öffnungen und/oder Rückstreuflächen eine ebene Oberfläche
35 (20) aus schwach oder gar nicht rückstreuenden Material

aufweist, die insbesondere aus Graphit besteht.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 zur Vermessung der Elektronenstrahl-Optik, dadurch gekennzeichnet, daß an einer Mehrzahl von Schlitten und/ oder Öffnungen und/oder Rückstreuflächen, die unterschiedliche Lage bezüglich der Einfallsrichtung des nicht abgelenkten Elektronenstrahles aufweisen, der Strahlquerschnitt des Elektronenstrahles vermessen wird und mit einem Strahlquerschnitt eines Elektronenstrahles verglichen wird, wie er bei fehlerfreier Elektronenstrahl-Optik erhalten wird, und/oder die Abbildungseigenschaften der Optik (15) gemessen werden.
- 15 20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßstruktur als Gitter ausgebildet wird, daß durch die Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl und Meßstruktur (16) zumindest ein erheblicher Teil des Gitters vom Elektronenstrahl getroffen wird und der Strom der rückgestreuten Elektronen in Abhängigkeit von der Relativbewegung in ein Bild der Meßstruktur umgesetzt wird und dieses Bild mit einem Sollbild der Meßstruktur verglichen wird, wie es bei fehlerfreier Elektronenstrahl-Optik erhalten wird.
- 25 21. Verfahren zum Kompensieren von Ablenkungsfehlern einer Elektronenstrahl-Optik, bei welchem die Abbildungseigenschaften der Elektronenstrahl-Optik (15) mit dem Verfahren gemäß Anspruch 19 oder 20 ermittelt werden und zumindest eine steuerbare Komponente der Optik so nachgeregelt wird, daß der Unterschied zwischen Ist-Bild und Soll-Bild der Meßstruktur minimiert wird.
22. Meßstruktur, insbesondere zur Verwendung in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 22, dadurch

gekennzeichnet, daß sie eine Basis aufweist, die mindestens einen Schlitz und/oder eine Öffnung und/ oder eine Rückstreufläche aufweist.

- 05 23. Meßstruktur nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Ebenen der Schlitze und/oder die Achsen der Öffnungen und/oder die Normale der Rückstreuflächen durch einen Hauptpunkt der Optik verlaufen.
- 10 24. Meßstruktur nach Anspruch 22 oder 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreuflächen durch Endflächen von Nadeln (22) gebildet sind, die vorzugsweise aus Metall, insbesondere aus einem schweren Metall wie Wolfram, gefertigt sind und von der Basis getragen sind.
- 15 25. Meßstruktur nach Anspruch 24, bei der die Nadel (22) an ihrem freien Ende glatt geschliffen ist, vorzugsweise im wesentlichen parallel zur ebenen Oberfläche (20) der Basis.
- 20 26. Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 25, dadurch gekennzeichnet, daß die ebene Oberfläche (20) der Basis aus schwach oder gar nicht rückstreuendem Material, insbesondere aus Graphit, gebildet ist.
- 25 27. Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß sie rückstreuende Bänder (46) aufweist, die ein Gitter bilden, und in den durch die Kanten der Gittermaschen begrenzten Flächen zusätzlich jeweils mindestens eine Rückstreufläche (22) aufweist.
- 30 28. Meßstruktur nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreuflächen (22) jeweils bei der Mitte der durch die Gitterlinien begrenzten Flächen liegen.

29. Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 28, gekennzeichnet durch eine in Strahlrichtung gesehen hinter ihr liegende Kollektorplatte (50).

05 30. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät, mit:

- einer Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 29, und
- einem im Elektronenstrahlgang vor der Meßstruktur angeordneten RückstreuElektronenmeßgerät (26).

31. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 30 dadurch gekennzeichnet, daß das RückstreuElektronenmeßgerät einen Sensorring (26) umfaßt, der vorzugsweise 15 eine Mehrzahl in Umfangsrichtung verteilter, vorzugsweise gleich verteilter Sensorsegmente (28) aufweist.

32. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 30 oder 31, gekennzeichnet durch eine Optik (15), die mittels 20 Steuersignalen einer Steuereinheit (30) elektronisch gesteuert wird, wobei eine Speichereinheit (30) gleichzeitig Signale von dem RückstreuElektronenmeßgerät (26) in Abhängigkeit von den Steuersignalen erfaßt.

25 33. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Optik (15) mit der Steuereinheit (30) sowie das RückstreuElektronenmeßgerät (26) zum Erzeugen eines rasterelektronenmikroskopischen Bildes ausgelegt sind.

30 34. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer im wesentlichen punktförmigen Rückstreufläche (22) der Meßstruktur (16) 35 in einer Elektronenstrahl-Optik (15) eine Fokussierlinse (12) in Strahlrichtung gesehen vor einer Strahl-Ablenk-

einheit (14) steht.

35. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 31, da-
durch gekennzeichnet, daß bei einer ausgedehnten Rück-
05 streufläche (22) der Meßstruktur (16) in einer Elek-
tronenstrahl-Optik (15) eine Fokussierlinse (12) in
Strahlrichtung gesehen hinter einer Strahl-Ablenkeinheit
(14) steht.

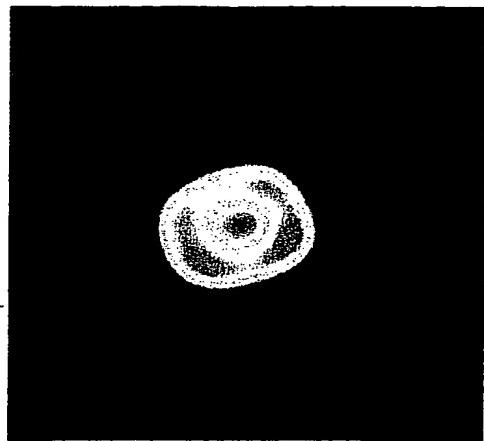
Zusammenfassung

Zur Messung des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls
05 wird der Elektronenstrahl (10) auf eine Meßstruktur
(16) geleitet, die Stellen (20, 22) mit unterschiedlichen
Rückstreuereigenschaften aufweist, und Rückstreuenelektronen
(24), die bei einer Abrasterung der Meßstruktur (16)
durch den Elektronenstrahl (10) mittels einer Ablenkein-
10 heit (14) entstehen, werden von einem Sensorring (26)
gemessen. Die Meßstruktur (16) ist vorzugsweise in ein
Elektronenstrahlschweißgerät ein- und ausbaubar und besteht
aus einer Graphitplatte (18), von der eine Wolframnadel
(22) senkrecht wegsteht.

15

(Figur 1)

Fig. 1



32

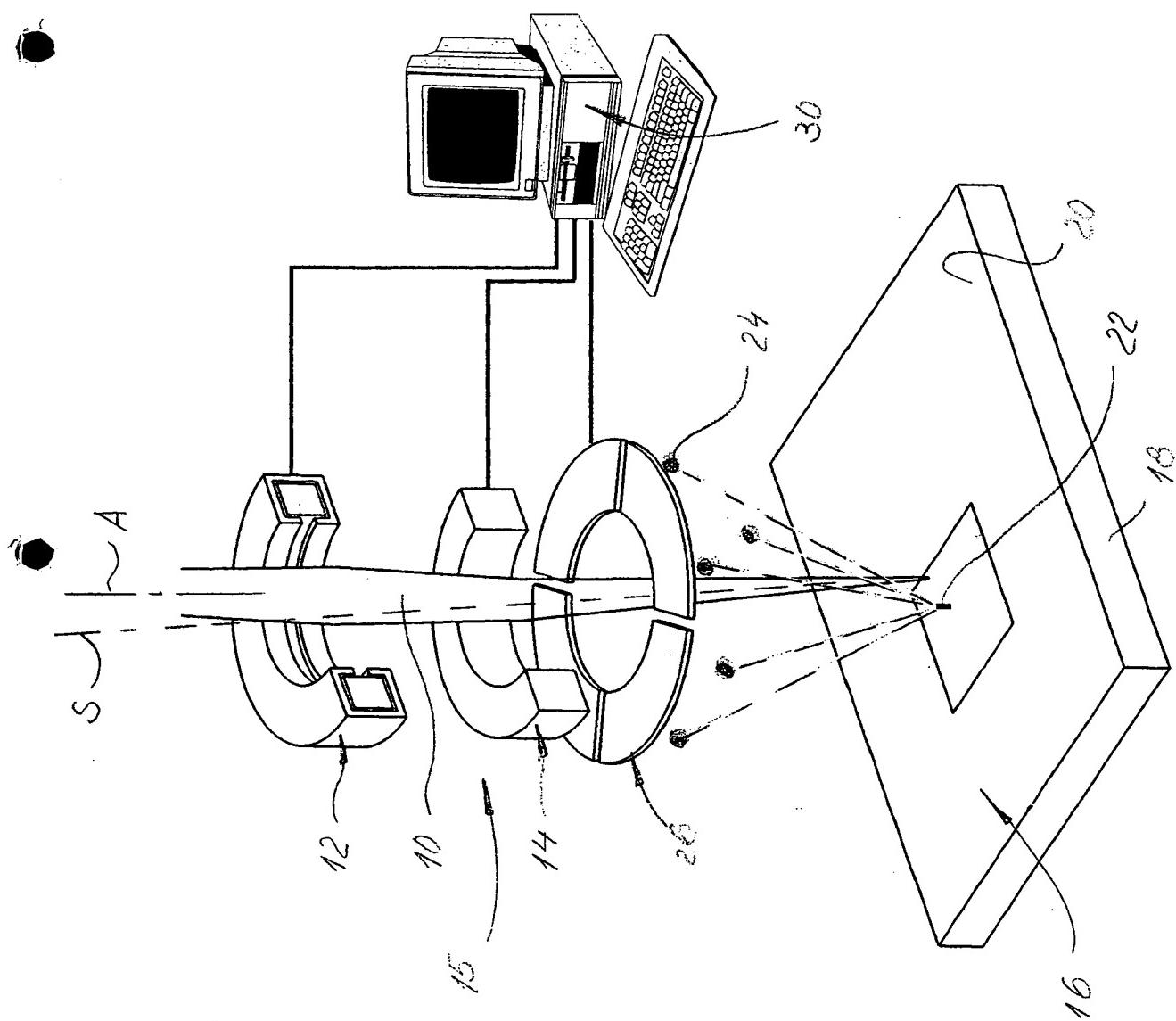
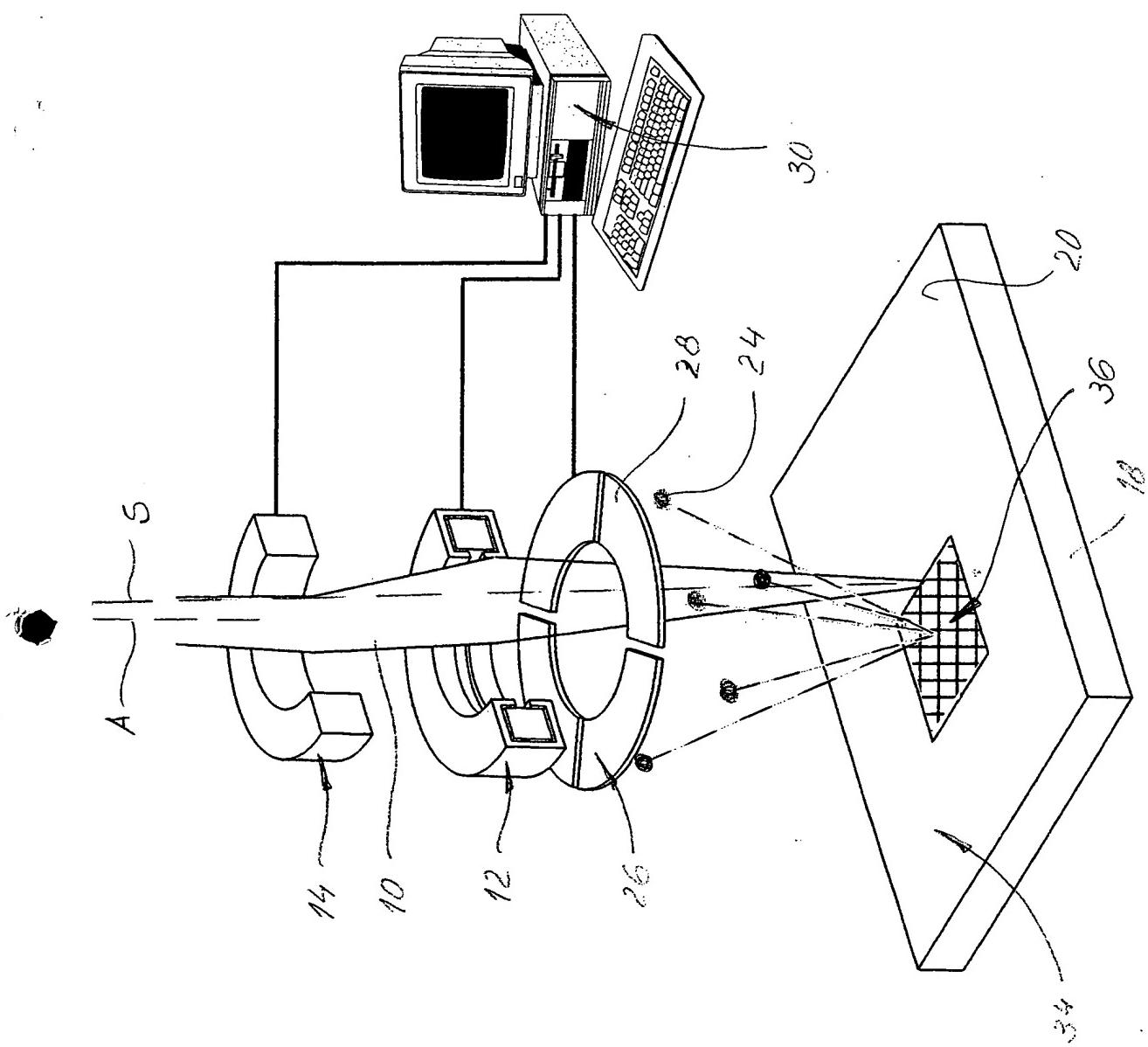
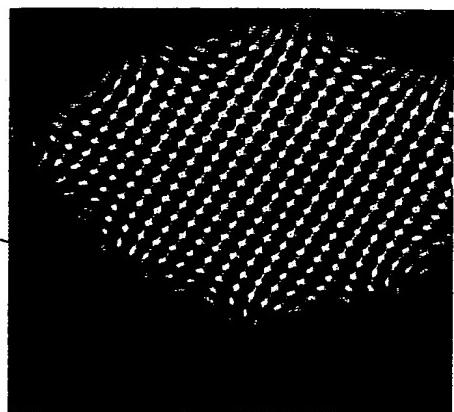


Fig. 2



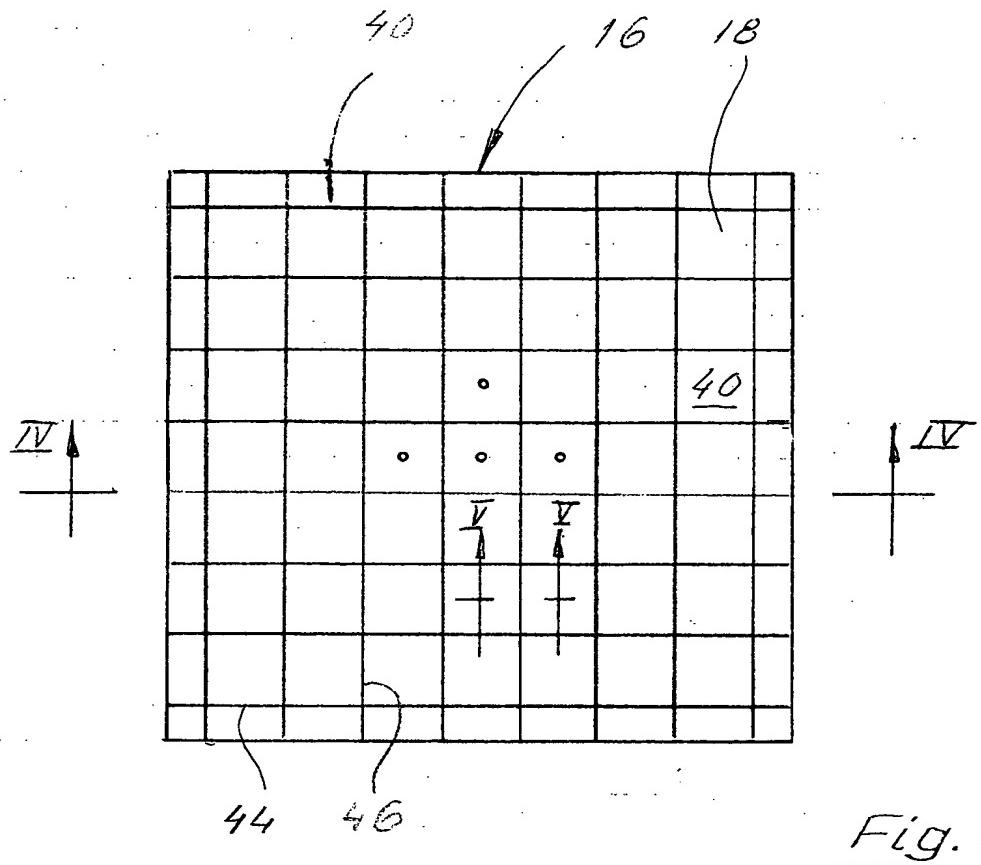


Fig. 3

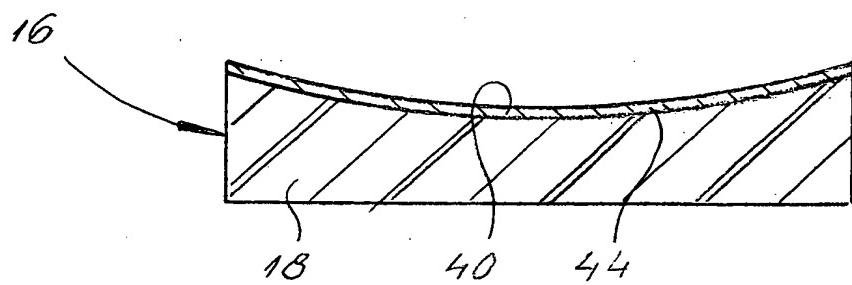


Fig. 4

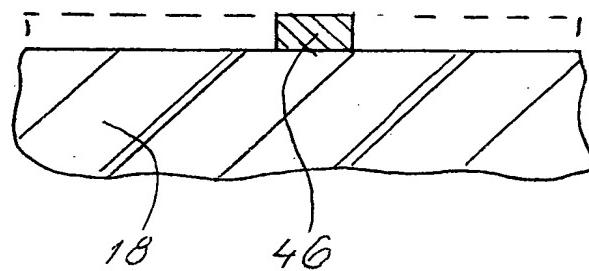
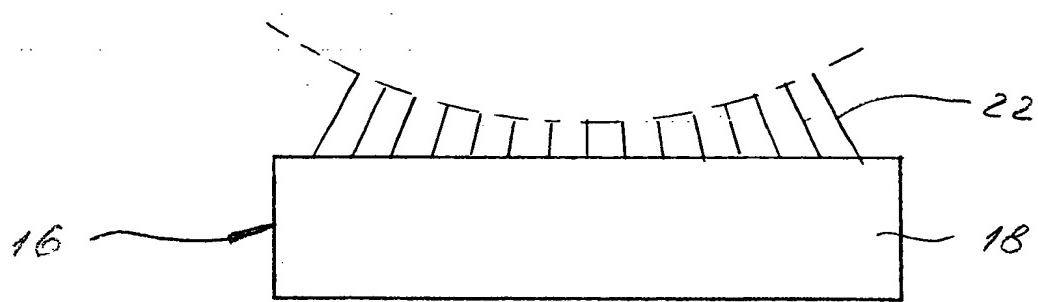


Fig. 5

x — H



x — H

Fig. 6

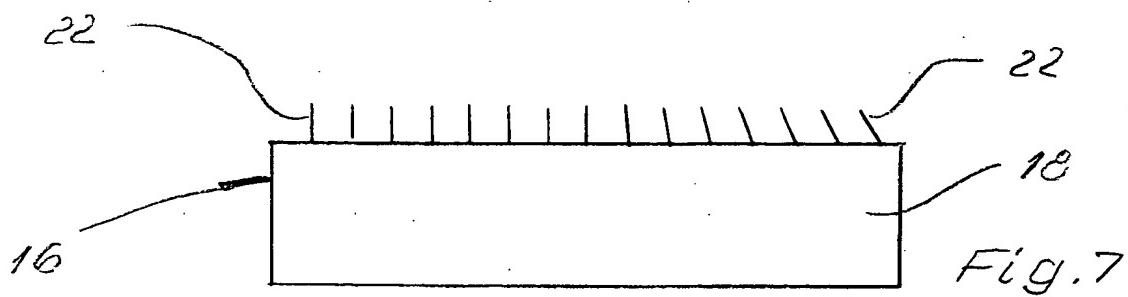


Fig. 7

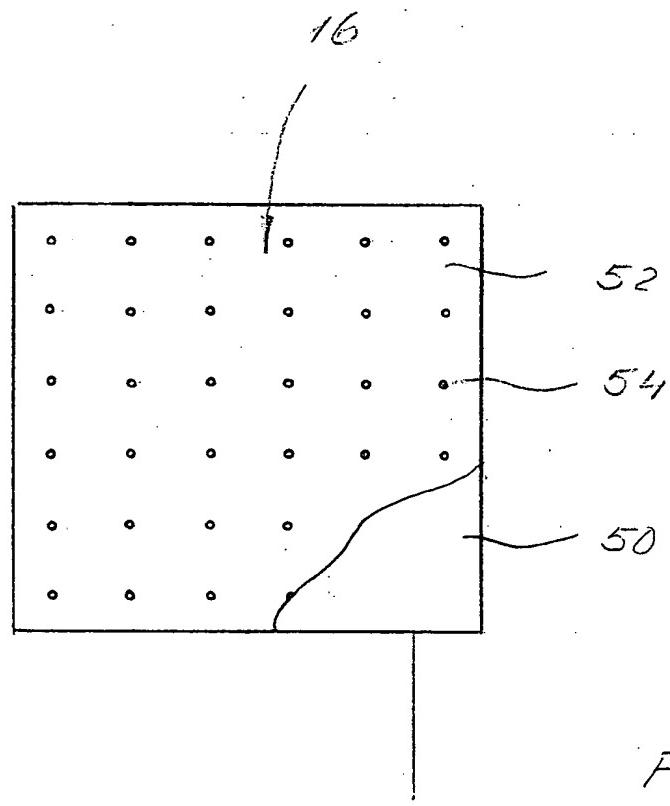


Fig. 8